

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СОВРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Самыми актуальными разработками асинхронных двигателей (АД) сейчас являются высокоэффективные (с повышенным КПД) и частотно-регулируемые, в том числе тяговые – для транспортных средств различной мощности и назначения.

У машин с повышенным КПД на 15-30% выше стоимость, по сравнению с обычными, несколько больше пусковые токи и ниже  $\cos\phi$ . Практика и расчеты показывают, что их применение экономически оправдано, если рабочий цикл включает не менее 80 часов в неделю.

Еще в 1992 г. в США был принят законодательный акт, установивший минимальный уровень КПД низковольтных трехфазных АД общего применения мощностью 0,75-150 кВт. Согласно этому стандарту производство менее эффективных двигателей облагалось большими штрафами. **Минимальный КПД нормировался только для полной нагрузки** и, конечно, зависел от номинальной мощности: у защищенных АД 0,75 кВт он равен 82,5%, 150 кВт - 95%. Стандарт не распространялся на другие конструктивные исполнения, на вертикальные, многоскоростные, двигатели постоянного тока, АД на экспорт и прошедшие ремонт.

Канада и Германия приняли аналогичные стандарты.

В Европейском союзе (ЕС) существует проект “Энергосбережение в электроприводе”. Его комиссия производителей электрических машин и силовой электроники в 1999 г. заключила добровольное соглашение с фирмами-изготовителями о переходе с 2000 г. на классификацию электродвигателей по трем уровням КПД (рис.1): *EFF3* - нормальный, *EFF2* – повышенный, *EFF1* – высокий. Фирмы брали на себя добровольное обязательство к 2004 г. сократить на 50% производство машин класса *EFF3*.

Российский стандарт ГОСТ Р 51677-2000 предусматривает для АД от 1,1 до 400 кВт всех чисел полюсов два уровня КПД: нормальный и повышенный.

Известно, что КПД производства, передачи и распределения электроэнергии в среднем равен 33%. Это означает, что каждый киловатт-час, сэкономленный электродвигателем, экономит 3 кВт·часа первичной энергии. А двигатели являются основными ее потребителями, т.е. “виновниками” выделения углекислого газа и образования парникового эффекта.

Исследовательский центр ЕС в августе 2005 г. провел в Швеции конференцию по энергоэффективности систем электроприводов. На ней было отмечено, что ряд национальных стандартов на электродвигатели и их компоненты мешает разработке и внедрению наиболее энергоэффективного оборудования. По всему миру должен быть введен стандарт минимальной энергоэффективности для предотвращения попадания на рынок низкоэффективных электродвигателей. Он будет стимулировать производство и продажи высокоэффективных машин. С этой целью было предложено ужесточить требования к КПД и, *начиная с 2010 года*, ввести следующие **категории энергоэффективных электродвигателей**:

**D** – минимальный уровень “стандартного двигателя”, соответствующий существующему уровню *EFF1*;

**C** – “хороший двигатель 2005 года” с уровнем энергоэффективности, соответствующим требованиям *EPACT* США;

**B** – “лучший двигатель 2005 года”, по КПД соответствующий *NEMA Premium*;

**A** – “лучший двигатель 2010 года”, имеющий потери на 20% ниже, чем машины категории B.

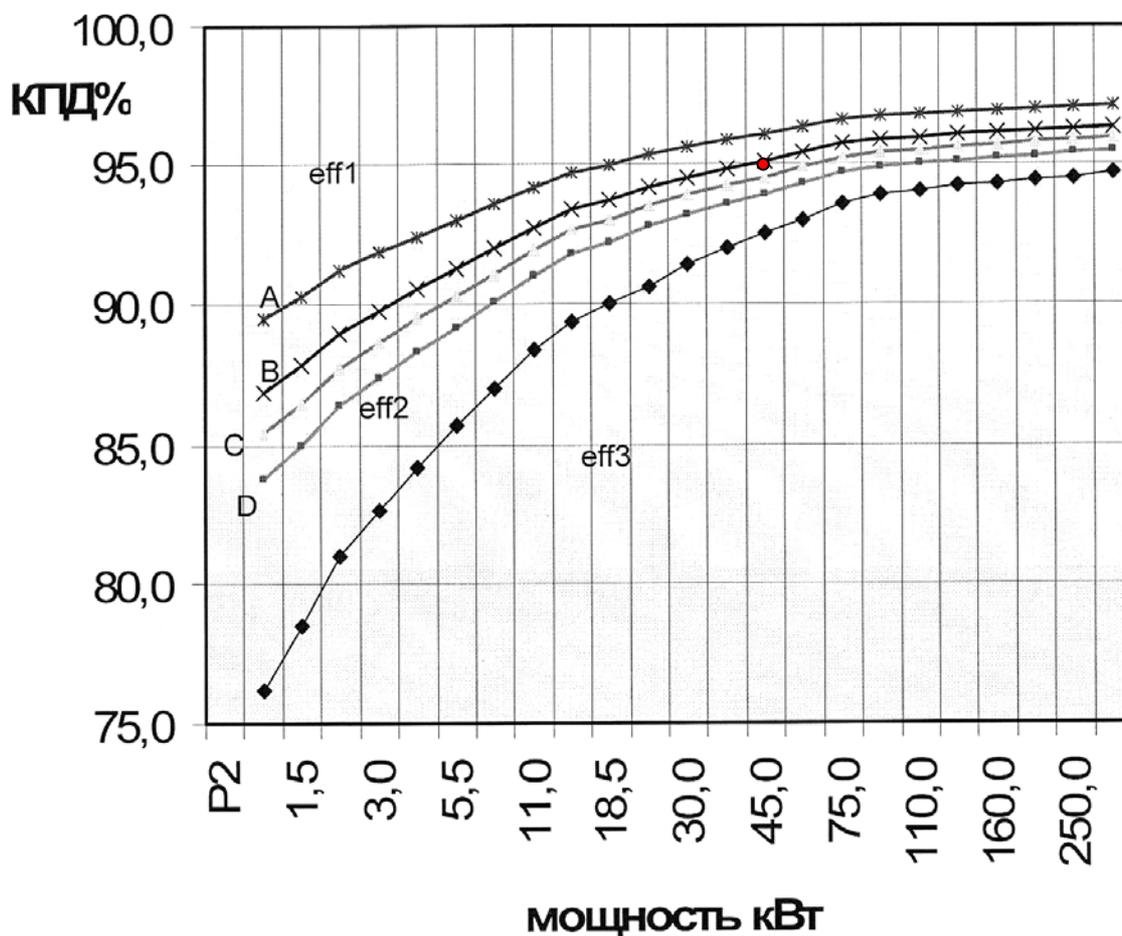


Рис. 1



Эти стандарты действуют на типовые АД с мощностью от 0,15 до 500 кВт.

АД с повышенным КПД уже выпускаются фирмами США, Великобритании, Германии, Бразилии и др. Фирма Siemens одна из первых освоила серийное производство машин с  $2p=2$  и 4, уровнями КПД *EFF1* и *EFF2*, на мощности от 1 до 90 кВт. Например, в ее двигателе увеличенного объема мощностью 5,5 кВт потери снижены на 42%. Годовой экономический эффект его применения во много раз выше увеличения стоимости, по сравнению со стандартными.

Расчеты показывают, что переход от *EFF2* к *EFF1* приводит к росту расхода материалов на 15-30%. Каждый дополнительный процент КПД требует увеличения массы активных материалов на 3-6%. Цена АД с уровнем *EFF1* примерно на 25% выше, чем класса *EFF2*. Следует иметь в виду, что при этом увеличивается на 20-50% момент инерции ротора. **Высокоэффективные двигатели уступают обычным по динамическим показателям**, если при их разработке специально не учитывается это требование.

**Повышению энергоэффективности приводов способствует частотное регулирование.** Достигнут значительный прогресс в преобразовательной технике, снижены цены на частотные преобразователи (ПЧ); уже сейчас для отдельных видов приводов цены на двигатели и преобразователи одной мощности фактически одинаковы. В дальнейшем при росте цен на энергоносители и металлы цены на двигатели будут повышаться, а с внедрением стандартов этот процесс ускорится. Поэтому в системе ПЧ – ЭД еще более важную роль будет играть электрическая машина, и разработке специальных машин для систем частотного регулирования необходимо уделять в программах развития новой техники особое внимание, поскольку **применение специального двигателя в целом снижает стоимость привода на ступень**. По данным

ведущих электротехнических компаний при этом резко сокращается применение регулируемых приводов с машинами постоянного тока и электродвигателей с фазным ротором. Они заменяются на частотно-регулируемые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, например, в приводах кранов, рольгангов, высокоскоростных лифтов, регулируемых насосов и вентиляторов, в деревообрабатывающих станках.

Специальные АД для частотно-регулируемых электроприводов выпускаются как зарубежными фирмами: *ABB*, *Siemens* – асинхронные и синхронные с постоянными магнитами, *Sicmemotori* (Италия), так и в России: ВЭМЗ (г.Владимир), Сибэлектромотор (г.Томск), ЯЭМЗ (г.Ярославль), Мосэлектромаш (г.Лобня, Московской обл.). В Белоруссии такие двигатели проектируются в ООО «Орион-мотор» и изготавливаются в ЗАО «Вольна». Эти двигатели унифицированы с общепромышленными двигателями по конструкции корпуса и по магнитной системе.

В их конструкции учтено то, что **частотно-регулируемый двигатель должен обладать следующими особенностями:**

1. Иметь более качественную изоляцию обмоток за счет применения обмоточного провода с двухслойной нагревостойкой витковой изоляцией и изоляционные материалы, рассчитанные на более высокие напряжения, вплоть до 2,2 номинального.
2. Двигатели, работающие в режиме частых пусков и торможений в приводах механизмов с большими моментами инерции, должны обладать высокими значениями максимального момента во всем диапазоне регулирования.
3. Двигатель требует другие обмоточные данные. Схемы обмоток должны обеспечивать электрическую и магнитную симметрию машины.
4. При глубоких диапазонах регулирования двигатели должны быть снабжены принудительной вентиляцией и тепловыми датчиками.
5. Для высокоточных и высокомоментных приводов в двигателях должны устанавливаться датчики скорости (энкодеры).
6. Система привода, содержащая двигатель и преобразователь частоты, должна быть точно рассчитана и адаптирована к решению конкретной технологической задачи.
7. Во всех случаях должны применяться моторные дроссели (фильтры).

Регулируемые энергосберегающие двигатели проектируются с температурным запасом не менее 20 °С (сервис-фактор 1,15), т.е. при классе нагревостойкости изоляции F расчетный перегрев обмотки статора выбирается для класса В. Это гарантирует возможность перегрузок и продолжительной эксплуатации при колебаниях питающего напряжения вплоть до  $\pm 10\%$ , а также повышает ресурс АД. Предусмотрены конструктивные и технологические мероприятия с целью существенного снижения шумов и вибраций машин новой серии (замена подшипников и дополнительная балансировка).

В частотно-регулируемых приводах традиционно продолжают использоваться нерегулируемые двигатели общего применения, рассчитанные на питание от промышленной сети и на работу с постоянной скоростью вращения ротора. В некоторых публикациях и рекламных материалах это даже представлено как достоинство частотно-регулируемых приводов.

**Использование обычных серийных АД в частотном приводе приводит к снижению КПД и требует завышения их установленной мощности на 15,5-20% при работе в установившихся режимах и до 40-45% – в динамических режимах.** Из-за высших гармоник напряжения и тока на выходе преобразователя частоты (ПЧ) на 5-6% возрастают потери в двигателе (это снижает КПД в среднем еще на 0,5%).

Ведущие российские и зарубежные разработчики и производители электрических машин и электроприводов единодушны в том, что **для частотного регулирования нужны специальные двигатели.** Создать универсальный, подходящий для всех случаев жизни частотно-регулируемый двигатель нельзя. Оптимальным он может быть

только для каждого конкретного сочетания закона регулирования и способа управления, диапазона регулирования частоты и характера нагрузки, то есть, в идеале двигателя необходимо дифференцировать по типам производственных механизмов, естественно, подсчитывая экономическую целесообразность такого разделения.

**Номинальное напряжение двигателя.** Если в регулируемом приводе применен серийный двигатель, без специальных мер ему обычно не хватает напряжения на выходе ПЧ. Следовательно, с целью упрощения системы логично предположить, что двигатель для комплектного частотного привода может быть рассчитан на нестандартное напряжение основной гармоники на выходе ПЧ. Оптимальную величину этого напряжения должны рекомендовать специалисты по преобразовательной технике.

**Перенапряжения.** ШИМ-коммутация современных ПЧ вызывает волновые переходные процессы и импульсные перенапряжения в системе ПЧ-двигатель. Характер процессов и величина перенапряжений зависят от крутизны фронтов питающих импульсов, индуктивных и емкостных параметров системы. Неблагоприятная величина перенапряжений в обмотке статора достигает двойного значения амплитуды поступающих импульсов и даже больше. Для защиты от них необходимо не только использовать фильтры, но и усиливать изоляцию начальных витков обмотки, правильно выбирать длину и конструкцию кабеля между ПЧ и двигателем, а также заземления.

**Шумы и вибрации.** Вентиляционный шум двигателей имеет две составляющие: *аэродинамическую и структурную* (от механических вибраций). При регулировании скорости вращения виброакустические показатели изменяются, причем для диапазонов низких скоростей преобладает структурная компонента, а для высоких – аэродинамическая. Значения скоростей и величины диапазонов зависят от числа полюсов двигателя. Разработчики и производители электродвигателей в разной мере учитывают рассмотренные выше особенности регулируемых АД, но **все допускают использование в частотных приводах обычных серийных АД с понижением их номинальной мощности в среднем на 15%.**

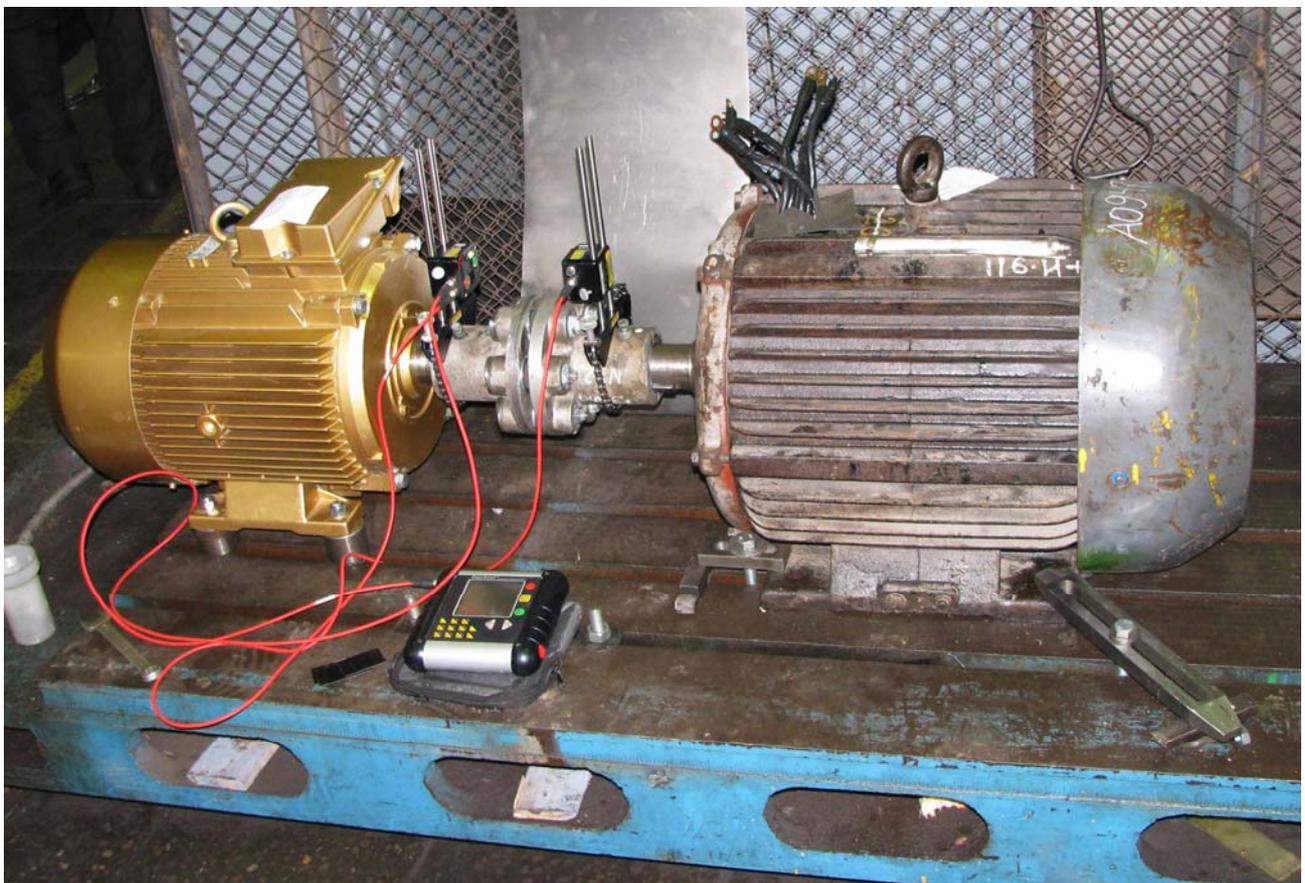
**Повышение КПД и удельной мощности.** По *удельной мощности* новые двигатели (АДР) для частотно-регулируемого привода превосходят базовые модели в **1,5-2,5** раза при векторном управлении без датчиков или с датчиками положения ротора. Этого удалось достичь применением частоты управления 100 Гц для 4х-полюсных двигателей и 150 Гц для 6-полюсных двигателей. Полезные мощности двигателей увеличились соответственно в 2 и 3 раза, а частотные потери в железе статора выросли незначительно. КПД моторов увеличился в среднем на 1,5-3 % по сравнению с двигателями аналогичной мощности 2х-полюсного исполнения (50 Гц, 3000 об/мин). **По КПД регулируемые двигатели АДР соответствуют требованиям уровня В (лучший двигатель 2005 года).**

Типовая группа двигателей АДР по габариту – с осью вращения **от 80 мм до 200 мм.** Диапазон регулируемых электродвигателей по мощности – **от 0,5 кВт до 160 кВт.**

#### **Примеры для сравнения:**

- 1) **АДР180S4** (45 кВт, 3000 об/мин, 100 Гц), **КПД = 94,5%, масса = 131 кг.**
- 2) **5A200L2** (45 кВт, 3000 об/мин, 50 Гц), **КПД = 93,4%, масса = 255 кг,** цена с учетом НДС ≈ 2050 USD (2008 год, Владимирский электромоторный завод).
- 3) **5A225M2** (55 кВт, 3000 об/мин, 50 Гц), **КПД = 93,4%, масса = 340 кг,** цена с учетом НДС ≈ 2400 USD (2008 год, Владимирский электромоторный завод).

Материал подготовил **Михалев А. И.** 27.01.2010 г.



Двигатели **ADR180S4** (45 кВт) и **5A200L2** (45 кВт) на испытательном стенде (метод взаимной нагрузки).

## ЧАСТОТНЫЙ ИНВЕРТОР:

### **«Брать или не брать? – Вот в чем вопрос...»**

- На практике не наблюдается эксплуатация обычного нерегулируемого асинхронного двигателя (АД) в номинальном режиме – как правило, сеть «кривая», температура воздуха колеблется в суточном и сезонном ритме, изменяется и момент полезной нагрузки, радиальная и осевая нагрузка на вал часто не является постоянной. По этим причинам режим работы двигателей не является номинальным, то есть не соответствует тем параметрам, что указаны в паспорте и на шильдике двигателя.
- Потребители обычно устанавливают АД со значительным запасом по мощности, чтобы снизить риск отказа двигателя из-за колебаний величины нагрузки, перегрузки по моменту и изменения климатических условий эксплуатации двигателя.
- В большинстве случаев средняя полезная мощность, снимаемая с двигателя, не превышает 50% от его номинальной мощности, поэтому он работает в точках, где КПД не оптимален, а реактивный ток двигателя по-прежнему соответствует его номинальной мощности. Применение «высокоэффективного» двигателя вместо нерегулируемого обычного двигателя в таком случае, как правило, не улучшает ситуацию в эксплуатации АД по части энергоэффективности, а может даже и ухудшить ее («виноват» низкий  $\cos\phi$  «высокоэффективного» двигателя).
- Во многих случаях *среднеквадратичная мощность двигателя* значительно превышает *среднюю мощность*, что приводит к перегреву двигателя. Это происходит при переменной нагрузке, например в кривошипном прессе, в деревообрабатывающих станках и в другом оборудовании.
- Условия пуска двигателей часто бывают весьма тяжелыми, что приводит к применению различных способов облегчения условий пуска двигателей – переключение со «звезды» на «треугольник», использование различной пускорегулирующей аппаратуры. Тяжелые условия пуска АД приводят к снижению его ресурса и надежности. Существуют и ограничения по количеству пусков в час или в сутки.
- Большинство указанных проблем снимается применением инвертора (ПЧ) с векторным управлением. Особенностью **векторного режима управления** является регулирование выходного напряжения инвертора в зависимости от скорости вращения двигателя и от величины нагрузки, то есть, момента.
- При любом сочетании этих двух основных параметров двигателя инвертор задает такое выходное напряжение, при котором двигатель работает в точке с максимально возможным КПД. Например, в режиме холостого хода двигателя или при малых нагрузках инвертор снижает выходное напряжение, подаваемое на двигатель.
- Указанный в примере для сравнения двигатель 5A225M2 (55 кВт, КПД = 93,4%, 3000 об/мин, 50 Гц) при управлении от инвертора будет иметь выходную мощность в диапазоне 45...47 кВт (85% от 55 кВт!). Его масса в 2,6 раза больше, чем у АДР180S4 УЗ (45 кВт, 3000 об/мин, 100 Гц, КПД = 94,5%). Указанный в справочных данных КПД для 5A225M2 при работе от инвертора снизится примерно до 92%.
- Если у потребителя «слабая» сеть, то применение АДР, рассчитанного, например, на 320 В переменного тока совместно с векторным инвертором позволит обеспечить нормальную работу привода с высоким КПД при снижении напряжения в сети до 15%. Условия пуска двигателя становятся регулируемыми и легкими при любой нагрузке, не превышающей номинальный пусковой момент для векторного режима. При таком управлении **снимаются все ограничения по количеству пусков в час или в сутки**.
- В промышленно развитых странах выбор в пользу частотно-регулируемого привода сделан именно из-за его экономической целесообразности, эффективности и энергосберегающих свойств.

- **Применение инвертора полностью защищает двигатель от перегрузки по току, от перенапряжений в сети и от перегрева, что увеличивает ресурс обмоток и подшипников двигателя.** Применение частотных инверторов снижает загрузку сети реактивным током и позволяет в большинстве случаев отказаться от применения автоматических емкостных компенсаторов реактивной мощности.
- **Надежность современных промышленных инверторов значительно выше, чем у традиционной релейной пускорегулирующей аппаратуры,** а электромагнитная совместимость и уровень излучаемых помех соответствуют всем современным требованиям.
- Есть еще один полезный практический момент, который следует учитывать – **имеется возможность задать «нестандартную» скорость вращения двигателя,** что весьма полезно для регулирования, оптимизации или повышения производительности механизма и технологического процесса. Применение подобного регулирования, например, в деревообрабатывающих станках позволяет увеличить их производительность и качество обработки древесины.
- Применение ПЧ с регулируемым асинхронным двигателем (АДР) позволяет достаточно **просто и недорого модернизировать старое технологическое оборудование** – увеличить его производительность, расширить диапазон регулирования технологических режимов, применить современный высокопроизводительный быстроходный инструмент – фрезы, сверла, шлифовальные круги, пилы, строгальные барабаны и режущие диски. Частота вращения двигателей АДР: с осью вращения до 160 мм – до **6000 об/мин**, с осью вращения от 180 мм до 225 мм – до **4500 об/мин**, с осью вращения от 250 мм – до **3600 об/мин**.

Материал подготовил **Михалев А. И.** 22.02.2010 г.